



Regroupement dynamique de tâches de maintenance des systèmes complexes

Canh Vu Hai*, Phuc Do Van**, Anne Barros*
Christophe Bérenguer***

* Université de Technologie de Troyes, Troyes, France

**CRAN, Université de Lorraine, Nancy, France

***Institut polytechnique de Grenoble, Grenoble, France

Réunion du GT S3, Paris, 18 Janvier 2013

Contexte et Motivation

Systemes complexes

- Les systèmes industriels sont de plus en plus complexes avec:
 - un grand nombre de composants;
 - plusieurs types de dépendance entre composants (dépendance économique, stochastique, structurelle);
 - *Une structure complexe* qui pourrait être le mélange des structures basiques (série, parallèle, k/n, . . .)
- Pour ces systèmes, une politique de regroupement de tâches de maintenance peut économiser:
 - les coûts de mise en oeuvre (coûts logistiques, coûts d'ouverture machine, . . .);
 - coûts d'arrêt du système.
- Cependant, les politiques de regroupement maintenance existantes ne sont applicables que sur des systèmes avec la structure basique.

Contexte et Motivation

Regroupement dynamique

- Systèmes de production face à plus de défis que jamais en raison de l'évolution des marchés imprévisibles et dynamiques, qui provoquent des changements dans les exigences de production: les exigences de la production, les caractéristiques géométriques des produits ou l'introduction de nouvelles technologies,...
- *Une stratégie de regroupement dynamique* est nécessaire pour mettre à jour le plan de maintenance en prenant en compte des informations à court terme.

Motivation

Notre travail consiste à développer *une stratégie de regroupement dynamique* pour des *systèmes à structure complexe* en utilisant:

- l'algorithme génétique pour chercher le plan optimal de regroupement;
- la méthode d'horizon roulant pour mettre à jour le plan de maintenance en prenant en compte les informations à court terme.

Contexte et Motivation

Motivation

Les informations à court terme:

- taux d'utilisation des composants;
- niveau de dégradation des composants;
- opportunités de maintenance;
- niveau de disponibilité du système;
- nombre de réparateurs disponibles;
- *Changements de la structure du système* (système reconfigurable).

Outline

- 1 Description du problème
- 2 Stratégie de regroupement
- 3 Exemples numériques
- 4 Conclusions

Outline

- 1 Description du problème
- 2 Stratégie de regroupement
- 3 Exemples numériques
- 4 Conclusions

Hypothèses

- Un système à structure complexe contient n composants.
- Le taux de défaillance de composant i est: $r_i(t) = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \left(\frac{t}{\lambda_i}\right)^{\beta_i-1}$
où, le paramètre d'échelle $\lambda_i > 0$, et paramètre de forme $\beta_i > 1$.
- Les durées de maintenance sont négligeables.

Maintenance préventive (PM): politique de remplacement

Coût de maintenance préventive: $C_i^P = S + c_i^P + \pi_i \cdot C_{sys}^P$

Où,

- S : coût de mise en oeuvre;
- c_i^P : coût spécifique de la PM;
- π_i : $\pi_i = 1$ si composant i est *un composant critique*; $\pi_i = 0$ si composant i est *un composant non-critique*;
- C_{sys}^P : coût d'arrêt planifié du système (perte de qualité des produits, coût de redémarrage du système, ...).

Maintenance corrective (CM): politique de réparation minimale

Coût de maintenance corrective: $C_i^c = S + c_i^r + \pi_i \cdot C_{sys}^u$.

- c_i^r : coût spécifique de CM;
- C_{sys}^u : coût d'arrêt non-planifié du système ($C_{sys}^u > C_{sys}^p$).

Problème de regroupement de tâches de maintenance préventive

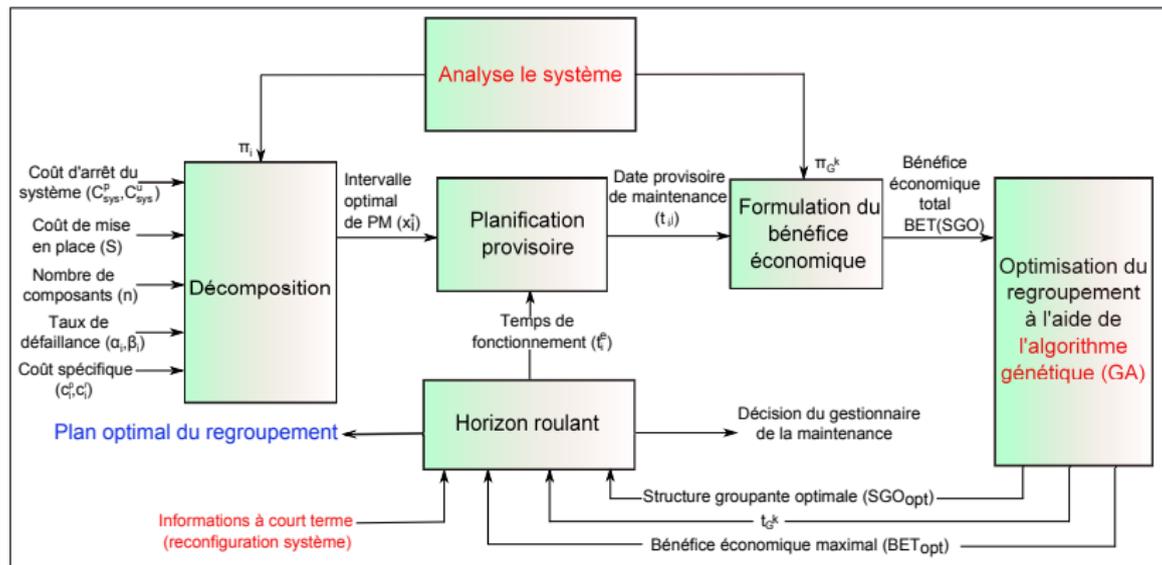
Plusieurs tâches de maintenance préventive sont regroupées afin de minimiser les coûts de maintenance.

- économiser le coût de mise en oeuvre;
- conduire à des coûts de pénalité en s'appuyant sur les dates de maintenance qui sont trop tôt ou trop tard;
- sous le regroupement, les coûts d'arrêt du système peuvent être économisés ou pénalisés (dépendre de la structure du système).

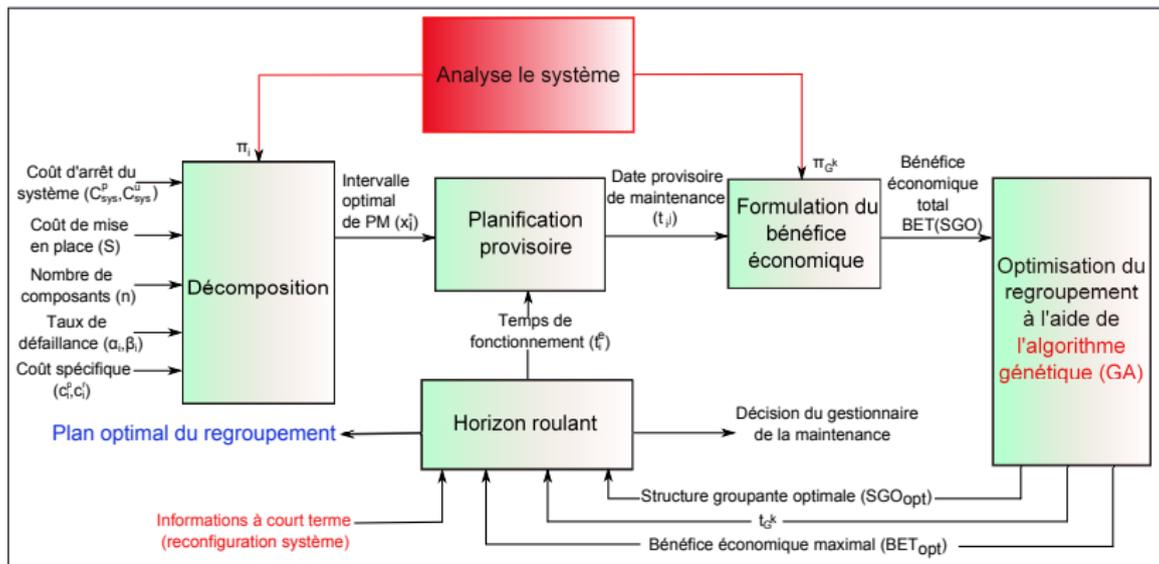
Outline

- 1 Description du problème
- 2 Stratégie de regroupement**
- 3 Exemples numériques
- 4 Conclusions

Regroupement dynamique basé sur l'horizon roulant et l'algorithme génétique



Etape 1: Analyse le système



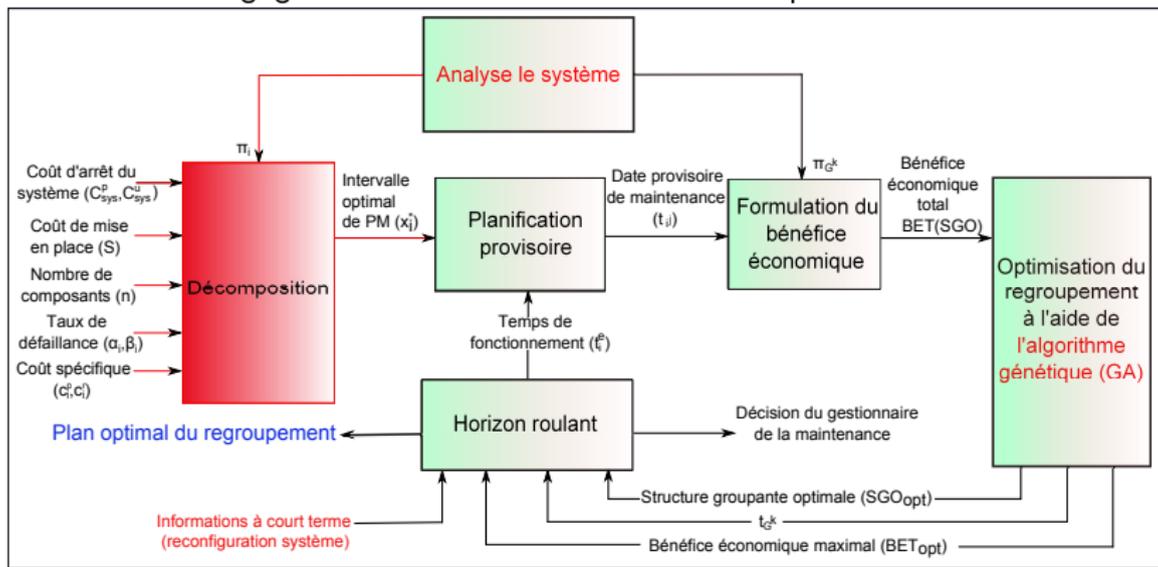
Etape 1: Analyse le système

Le système est analysé pour déterminer le rôle (critique ou non-critique) des composants ou des groupes de composants.

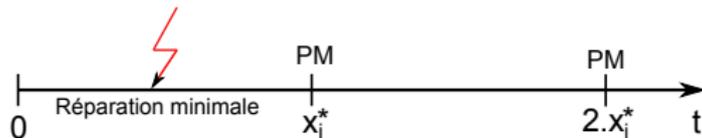


Etape 2: Décomposition

L'intervalle optimal de PM (x_i^*) pour chaque composant est individuellement déterminé en négligeant les interactions entre les composants.



Etape 2: Décomposition



- Le coût cumulé $E_i(x)$ dans l'intervalle $[0, x]$:

$$E_i(x) = C_i^p + C_i^c \cdot \left(\frac{x}{\lambda_i}\right)^{\beta_i}$$

- Le coût moyen de maintenance:

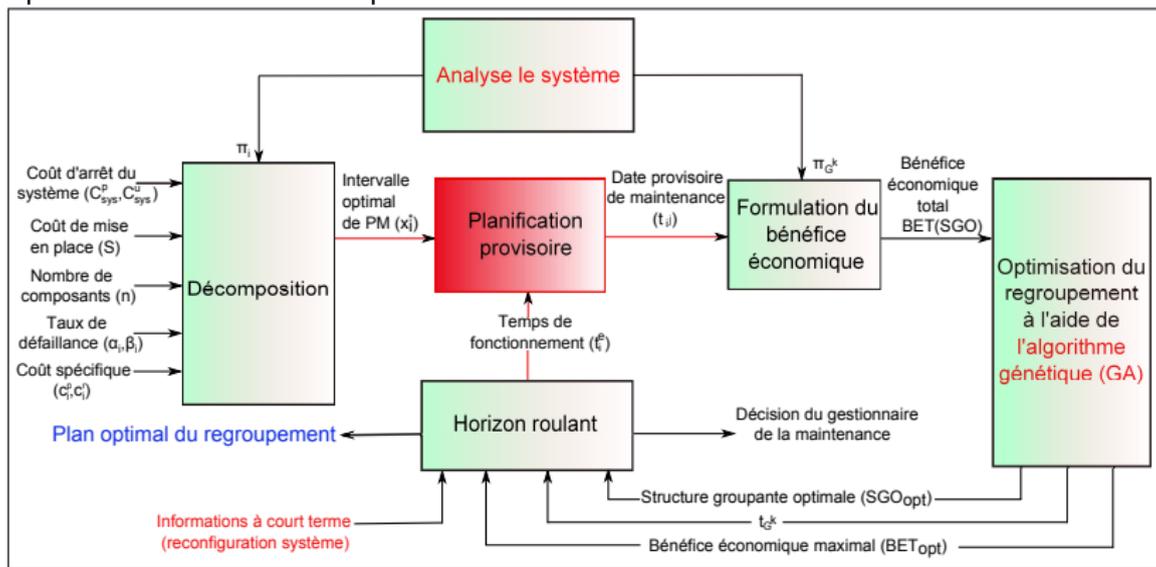
$$\phi_i(x) = \frac{E_i(x)}{x}$$

- L'intervalle optimal de PM (x_i^*):

$$x_i^* = \arg \min_x \phi_i(x) = \lambda_i \sqrt[\beta_i]{\frac{C_i^p}{C_i^c(\beta_i - 1)}}$$

Etape 3: Planification provisoire

Le plan provisoire de la maintenance est établi en fonction des intervalles optimaux de PM des composants.



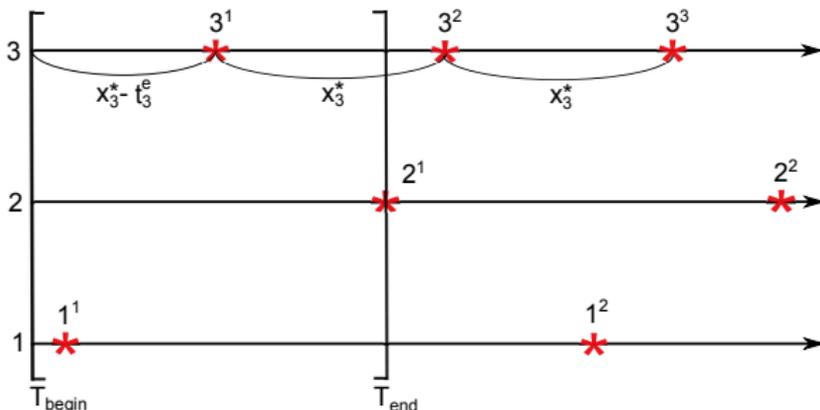
Etape 3: Planification provisoire

$$t_{j1} = t_{begin} - t_i^e + x_i^*; \quad t_{jj} = t_{j-1}^* + x_i^* \text{ if } j > 1$$

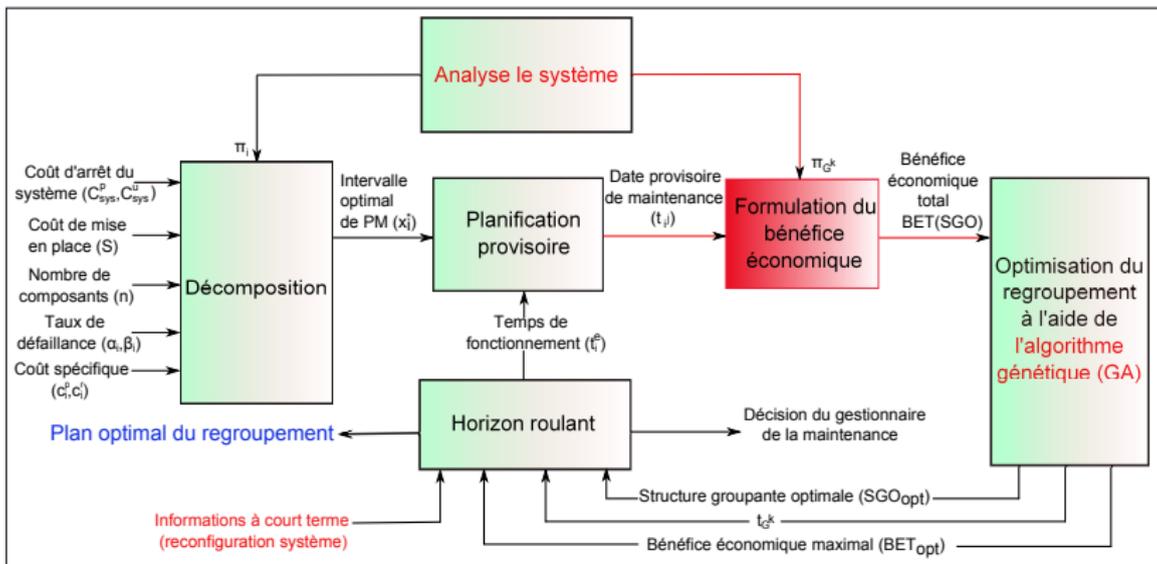
Où, j^i est la $j^{\text{ème}}$ opération de maintenance préventive du composant i et t_i^e est le temps de fonctionnement du composant i .

Un horizon fini est établi:

- $T_{begin} = 0$: date actuelle;
- $T_{end} = \max(t_{j1})$: tous les composants sont maintenus en préventive au moins une fois.



Etape 4: Formulation du bénéfice économique



Etape 4: Formulation du bénéfice économique

Le bénéfice économique de groupe G^k , $BE(G^k)$:

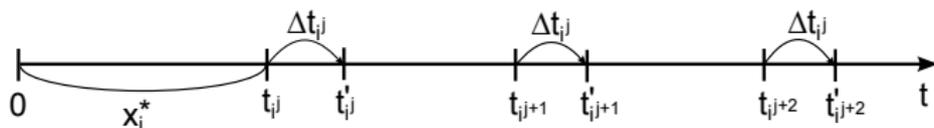
$$BE(G^k) = U_{G^k} - \Delta H_{G^k}^{1*} - \Delta H_{G^k}^2$$

Où, U_{G^k} est la réduction du coût de mise en oeuvre et dépend du nombre de composants dans ce groupe (nc):

$$U_{G^k} = (nc - 1) \cdot S$$

$\Delta H_{G^k}^{1*}$ est le coût de pénalité à cause des mouvements des dates provisoires:

$$\Delta H_{G^k}^{1*} = \min_{t_{G^k}} \sum_{ij \in G^k} h_i(t_{G^k} - t_{ij})$$

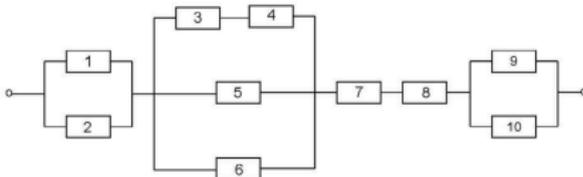


$$h_i(t_{G^k} - t_{ij}) = h_i(\Delta t_{ij}) = E_i(x_i^* + \Delta t_{ij}) - (E_i(x_i^*) + \Delta t_{ij} \cdot \phi_i^*)$$

Etape 4: Formulation du bénéfice économique

$\Delta H_{G^k}^2$ est le changement du coût d'arrêt planifié total du système, *dépend de la structure du système*:

$$\Delta H_{G^k}^2 = C_{sys}^p \cdot (\pi_{G^k} - \sum_{ij \in G^k} \pi_{ij})$$



Systèmes en séries	Systèmes à structure complexe
$\Delta H_{G^k}^2 = C_{G^k} - C_{notG^k} = C_{sys}^p \cdot \pi_{G^k} - C_{sys}^p \cdot \sum_{ij \in G^k} \pi_{ij} = C_{sys}^p \cdot (\pi_{G^k} - \sum_{ij \in G^k} \pi_{ij})$	$\Delta H_{G^k}^2 = C_{sys}^p \cdot (\pi_{G^k} - \sum_{ij \in G^k} \pi_{ij})$
$(\pi_{G^k} = 1 \text{ si } G^k \text{ est un groupe critique, } \pi_{G^k} = 0 \text{ si } G^k \text{ est un groupe non-critique})$	
$\pi_{ij} = 1, \forall i \text{ et } \pi_{G^k} = 1, \forall G^k$ $\rightarrow \Delta H_{G^k}^2 = -(m-1)C_{sys}^p < 0, \forall G^k$ \rightarrow <i>impact positif</i>	$G^1 = (1,2), \pi_1 + \pi_2 = 0, \pi_{G^1} = 1 \rightarrow \Delta H_{G^1}^2 = C_{sys}^p > 0$ \rightarrow <i>impact négatif</i>
	$G^2 = (1,5), \pi_1 + \pi_5 = 0, \pi_{G^2} = 0 \rightarrow \Delta H_{G^2}^2 = 0$ \rightarrow <i>il n'y a pas d'impact</i>
	$G^3 = (7,8), \pi_7 + \pi_8 = 2, \pi_{G^3} = 1 \rightarrow \Delta H_{G^3}^2 = -C_{sys}^p < 0$ \rightarrow <i>impact positif</i>

Etape 4: Formulation du bénéfice économique

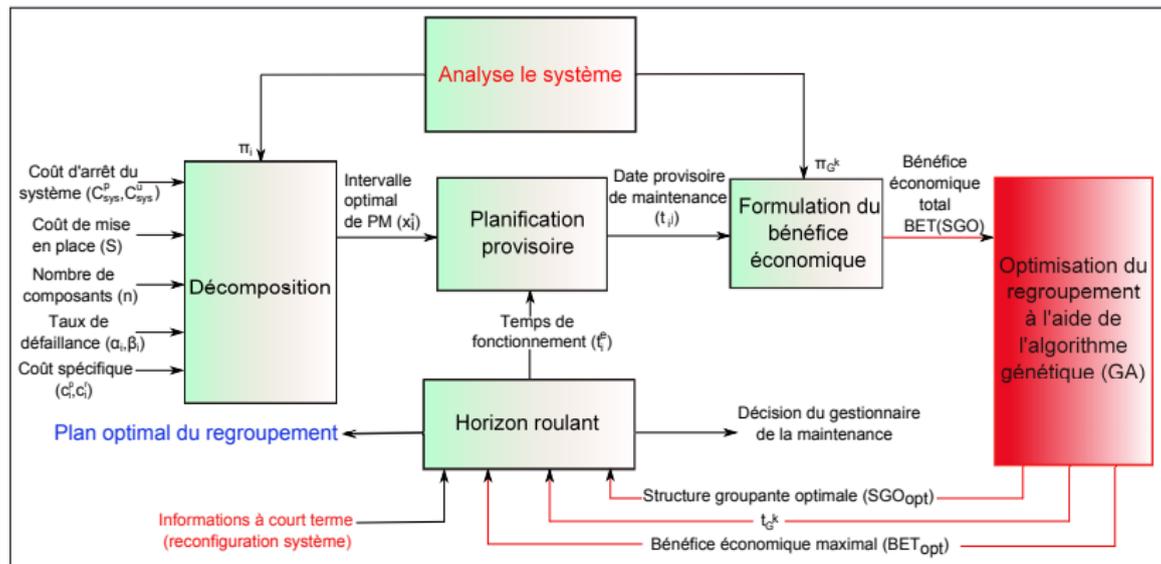
Une structure groupante des opérations (SGO): une collection de groupes mutuellement exclusifs, G^1, \dots, G^m , ce qui couvre toutes N opérations de PM ($N \geq n$) dans l'intervalle de planification.

$$G^l \cap G^k = \emptyset, \forall l \neq k \text{ and } G^1 \cup \dots \cup G^m = \{1 \dots N\}. \quad (1)$$

Le bénéfice économique total (BET):

$$BET(SGO) = \sum_{G^k \in SGO} BE(G^k) = \sum_{G^k \in SGO} (U_{G^k} - \Delta H_{G^k}^{1*} - \Delta H_{G^k}^2).$$

Optimisation du regroupement à l'aide de l'algorithme génétique (GA)



Etape 5: Optimisation du regroupement à l'aide de l'algorithme génétique (GA)

La recherche de la structure groupante optimale est un problème NP-difficile.

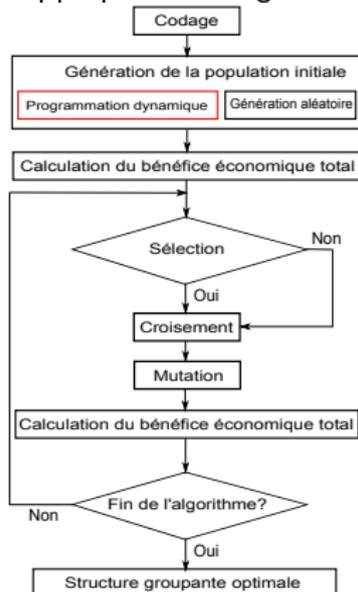
Nombre d'opérations (N)	Nombre de SGOs possibles	Temps de calculs
10	115975	46 secondes
11	678570	5 minutes
12	4213597	28 minutes
13	27644437	3 heures
14	190899322	21 heures
15	$1.3830 \cdot 10^9$	6,48 jours
16	$1.048 \cdot 10^{10}$	50 jours
17	$8.2865 \cdot 10^{10}$	1 années
18	$6.8208 \cdot 10^{11}$	8,7 années
19	$5.8327 \cdot 10^{12}$	75 années
20	$5.1724 \cdot 10^{13}$	664 années

R.E.Wildeman et all ont proposé le théorème d'opérations consécutives pour réduire le nombre de SGOs possibles et utilisé la programmation dynamique pour trouver la structure groupante optimale.

A cause des impacts de la structure sur le regroupement, le théorème d'opérations consécutives n'est plus valable.

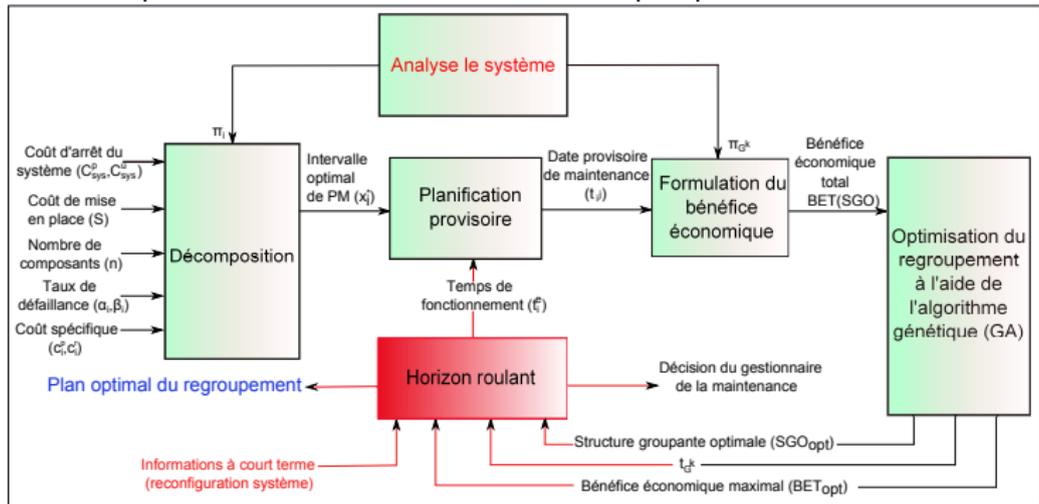
Etape 5: Optimisation du regroupement à l'aide de l'algorithme génétique (GA)

L'algorithme génétique: est présenté comme un outil général pour résoudre les problèmes d'optimisation et appliqué sur un grand nombre de problèmes.



Etape 6: Horizon roulant

En prenant en compte des informations à court terme, le gestionnaire de la maintenance peut décider de revenir sur les étapes précédentes.



Etape 6: Horizon roulant

- retourner à l'étape 5: planification pour un nouvel horizon, une opportunité de maintenance, niveau de la disponibilité du système, nombre de réparateurs disponibles;
- retourner à l'étape 3: taux d'utilisation des composants;
- retourner à l'étape 2: changements de la caractère des composants (nouvelle technologies), changement de la dégradation des composants;
- **retourner à l'étape 1: changements de la structure du système:**
 - ajouter / supprimer certains composants redondants en raison des changements de la demande des produits ou la demande de la sécurité / tolérance aux pannes.
 - changer les interconnexions entre les composants comme dans les "phased-mission system (PMS)".

Outline

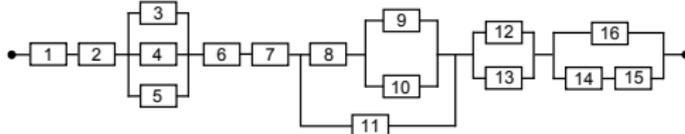
- 1 Description du problème
- 2 Stratégie de regroupement
- 3 Exemples numériques**
- 4 Conclusions

Exemple 1

Les données

$n = 16$, $S = 30$, $C_{sys}^p = 60$, $C_{sys}^u = 70$.

La structure du système:



Composant i	λ_i	β_i	c_i^p	c_i^u	t_i^e
1	170	1.55	205	120	302.10
2	250	1.75	105	72	246.58
3	190	2.00	245	98	175.49
4	200	2.00	235	107	158.16
5	108	1.70	385	152	81.33
6	285	2.00	345	80	306.05
7	209	1.95	225	102	124.48
8	97	1.75	345	50	116.41
9	84	1.50	345	76	143.59
10	149	1.50	165	92	143.34
11	190	2.00	345	78	169.04
12	117	1.70	305	66	51.01
13	205	1.75	225	96	95.49
14	241	1.75	105	52	87.69
15	300	1.80	105	92	64.25
16	235	2.00	225	65	85.01

Regroupement dynamique sans compter la structure du système

$\pi_i = 1, \forall i$. Structure groupante optimale en ignorant la structure du système:

Groupe	Composants	t_{G^k}	$BE(G^k)$	π_{G^k}	BET
1	1, 2, 3, 4, 8, 9, 5, 11, 6, 10, 7	102.12	848.34	1	1196
2	12, 13, 16, 14, 15	220.55	347.66	1	

Le coût moyen de maintenance du système avant regroupement:

$$\phi_{\overline{SG}} = \sum_{i=1}^n \phi_i^* = 46.53$$

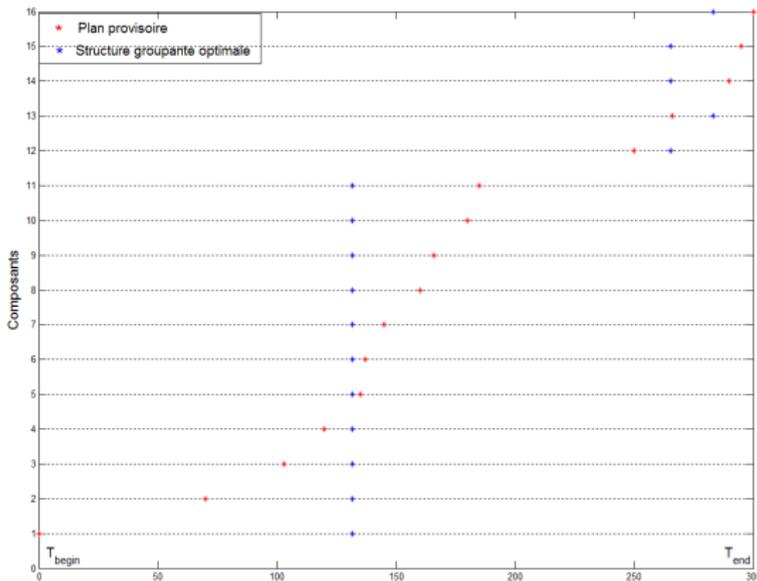
Le coût moyen de maintenance du système après regroupement:

$$\phi_{\overline{SG}} = \phi_{\overline{SG}} - \frac{BET}{T_{end}} = 43.23$$

Regroupement dynamique en prenant en compte la structure du système

$$\pi_1 = \pi_2 = \pi_6 = \pi_7 = 1.$$

GA donne le résultat dans 56.07 secondes (au lieu de 50 jours).



Stratégies	Groupe	Composants	t_{G^k}	$BE(G^k)$	π_{G^k}	BET
La programmation dynamique	1	1,2,3,4,5,6,7,8,9	124.67	362.97	1	474.15
	2	10,11,12	211.65	51.81	0	
	3	13,14,15	279.623	59.37	0	
	4	16	300.00	0	0	
l'algorithme génétique (GA)	1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	131.76	409.52	1	496.46
	2	12,14,15	265.53	57.93	0	
	3	13,16	283.11	29.01	0	

Le coût moyen avant regroupement: $\phi_{sys}^{SG} = 35.1714$.

Le coût moyen de maintenance du système après regroupement:

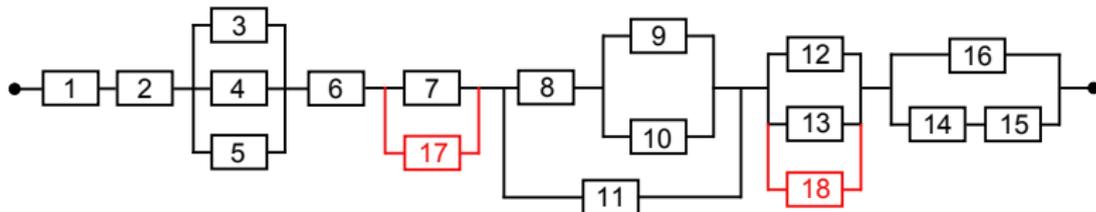
$$\phi_{sys}^{SG} = 33.5165$$

$$\phi_{sys}^{SG} < \phi_{sys}^{S\bar{G}} < \phi_{sys}^{\bar{S}G} < \phi_{sys}^{\bar{S}\bar{G}}$$

Les résultats montrent que le regroupement peut économiser le coût de maintenance et que la structure du système a un rôle important et doit être prise en compte dans la planification de maintenance.

Regroupement dynamique avec la prise en compte le changement de la structure du système

Afin de répondre à la demande de la production, deux composants 17 et 18 sont ajoutés à l'instant $t_{ref} = 200$.



Component i	λ_i	β_i	c_i^P	c_i^r	t_i^e
17	150	1.95	400	120	0.00
18	130	2.05	450	100	0.00

Retourner à la première étape pour mettre à jour le statut des composants:

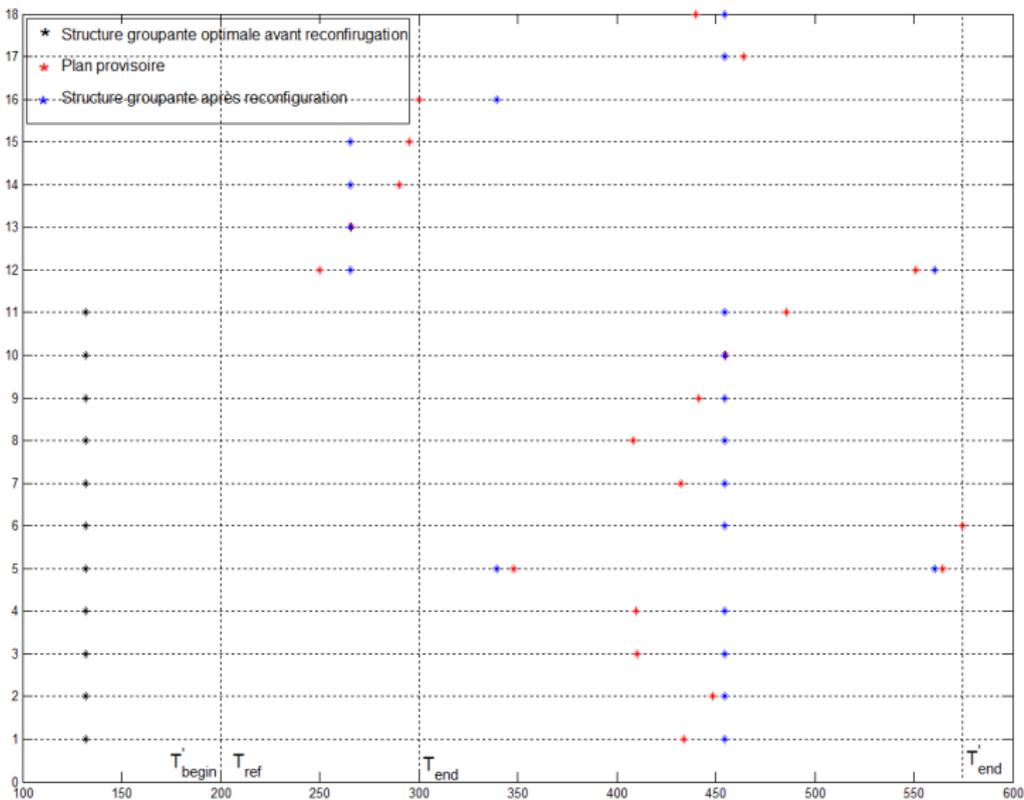
Components	1	2	3	4	5	6	7,...,18
π_i	1	1	0	0	0	1	0

Mettre à jour le temps de fonctionnement des composant:

$$t_i^{e'} = t_{ref} - t_{G^1}, \text{ si } i \in G^1$$

$$t_i^{e'} = t_i^e + t_{ref} \text{ si } i \in (G^2 \cup G^3)$$

Mettre à jour le plan provisoire, le horizon de recherche et la nouvelle structure groupante optimale.



L'algorithme génétique donne le résultat optimal dans 183 secondes (au lieu de 664 années).

Groupe	composants	t_{G^k}	$BE(G^k)$	π_{G^k}	BET
1	12, 13, 14, 15	265.65	87.93	0	534.35
2	5, 16	339.20	226.76	0	
3	1, ..., 4, 6, ..., 12, 17, 18	454.76	390.06	1	
4	5 ² , 12 ²	560.50	29.60	0	

Composant	12	13	14	15	16
Date de maintenance avant reconfiguration	265.53	283.11	265.53	265.53	283.11
Date de maintenance après reconfiguration	265.65	265.65	265.65	265.65	339.20

Le coût moyen de maintenance du système avant regroupement: $\phi_{sys}^{RS\bar{G}} = 41.76$
 Le coût moyen de maintenance du système après regroupement: $\phi_{sys}^{RSG} = 40.33$.

Exemple 2

Les donnés

Consider un système en séries avec 20 composants; $S=10$; la durée de PM est notée par d_i ; le cout d'indisponibilité du système $C^d = 5$; A_0 est la demande de disponibilité du système et nr est le nombre de réparateurs disponibles.

Composants	λ_i	β_i	c_i^p	c_i^r	d_i	t_i^e	Composants	λ_i	β_i	c_i^p	c_i^r	d_i	t_i^e
1	288	1.9334	168	42	1	638.98	11	265	1.9223	106	57	2	161.57
2	281	1.9797	159	47	2	508.91	12	286	1.9731	123	51	5	239.35
3	276	1.9965	155	47	6	486.87	13	268	1.9246	123	38	5	275.31
4	264	1.9930	111	36	2	405.53	14	291	1.9777	117	41	1	206.62
5	288	1.9244	142	38	3	538.48	15	252	1.9480	103	57	5	53.79
6	270	1.9209	108	59	4	252.64	16	291	1.9196	146	44	2	248.10
7	265	1.9417	127	46	3	313.84	17	256	1.9585	158	53	5	129.09
8	278	1.9271	180	31	5	580.86	18	277	1.9358	134	58	5	56.08
9	294	1.9992	180	50	4	378.94	19	267	1.9859	171	58	4	15.83
10	265	1.9098	159	58	3	259.66	20	266	1.9509	187	31	6	224.36

Regroupement dynamique sous la contrainte de disponibilité avec un nombre limité de répérateurs

A_0	nr	BET	SGO optimale	t_G^k	d_G
0.8795	nr = 1	148.64	$G1 = \{1, \dots, 5\}$ $G2 = \{6, \dots, 12\}$ $G3 = \{13, \dots, 17\}$ $G4 = \{18, \dots, 20\}$	67.16 242.96 389.25 538.56	14 26 18 15
	nr = 2	323.76	$G1 = \{1, \dots, 5\}$ $G2 = \{6, \dots, 12\}$ $G3 = \{13, \dots, 16\}$ $G4 = \{17, \dots, 20\}$	67.16 235.96 359.69 477.92	7 13 7 10
	nr = 3	374.29	$G1 = \{1, \dots, 5\}$ $G2 = \{6, \dots, 12\}$ $G3 = \{13, \dots, 20\}$	67.16 234.96 415.45	6 9 11
	nr = 4	397.61	$G1 = \{1, \dots, 8\}$ $G2 = \{9, \dots, 16\}$ $G3 = \{17, \dots, 20\}$	116.33 299.04 464.92	7 7 6
	nr = 5	413.95	$G1 = \{1, \dots, 7\}$ $G2 = \{8, \dots, 14\}$ $G3 = \{15, \dots, 20\}$	108.15 269.69 431.05	6 5 6
	nr = 6	419.29	$G1 = \{1, \dots, 5\}$ $G2 = \{6, \dots, 12\}$ $G3 = \{13, \dots, 20\}$	67.16 234.96 411.45	6 5 6
	nr ≥ 7	421.10	$G1 = \{1, \dots, 5\}$ $G2 = \{6, \dots, 14\}$ $G3 = \{15, \dots, 20\}$	67.16 250.95 431.05	6 5 6

A_0	nr	BET	SGO Optimale	t_G^k	d_G
0.9719 ($D_0 = 17$)	nr < 5	No solution			
	nr = 5	413.95	$G1 = \{1, \dots, 7\}$	108.15	6
			$G2 = \{8, \dots, 14\}$	269.69	5
			$G3 = \{15, \dots, 20\}$	431.05	6
nr = 6	419.29	$G1 = \{1, \dots, 5\}$	67.16	6	
		$G2 = \{6, \dots, 12\}$	234.96	5	
		$G3 = \{13, \dots, 20\}$	411.45	6	
nr ≥ 7	421.10	$G1 = \{1, \dots, 5\}$	67.16	6	
			$G2 = \{6, \dots, 14\}$	250.95	5
			$G3 = \{15, \dots, 20\}$	431.05	6
0.9835 ($D_0 = 10$)	nr < 8	No solution			
	nr = 8	305.63	$G1 = \{1\}$	0	1
	nr = 9		$G2 = \{2, \dots, 20\}$	276.39	9
	nr ≥ 10	373.56	$G1 = \{1, 2, 4, \dots, 7, 9\}$	131.11	4
$G2 = \{3, 8, 10, \dots, 20\}$			334.16	6	
0.9901 ($D_0 = 6$)	nr < 13	No solution			
	nr ≥ 13	304.28	$G1 = \{1, \dots, 20\}$	265.03	6

Exemple 3

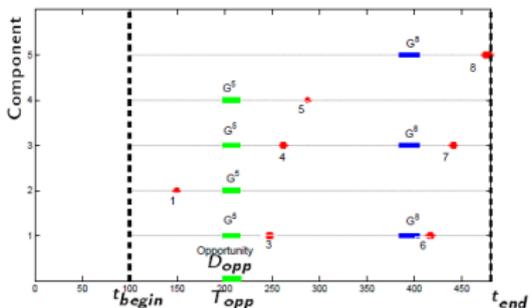
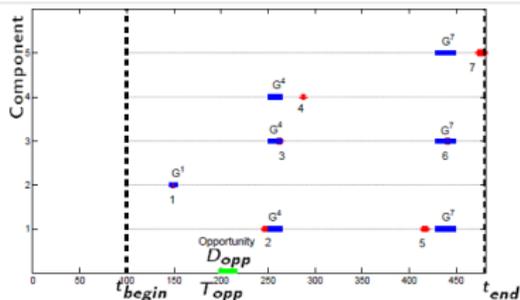
Les donnés

Consider un système en séries avec 5 composants; $S=30$; la durée de PM est notée par d_i ; le cout d'indispobilité du système $C^d = 10$;

Component i	1	2	3	4	5
λ_i	159	108	49	97	84
β_i	2.7	1.7	1.25	1.75	1.5
c_i^p	225	585	105	345	345
C_i^c	182	172	150	50	100
d_i	5	3	4	2	8
t_i^e	108	159	137	130	306

Regroupement dynamique avec la prise en compte des opportunités de maintenance

- **New information** is available at $t = 100$
 - $T_{opp} = 200$
 - $D_{opp} = 15$
- Grouping without taking into account this opportunity
 - ⇒ Cost saving=**112.61**
- Grouping **with the opportunity**,
 - ⇒ Cost saving=**192.98**



Outline

- 1 Description du problème
- 2 Stratégie de regroupement
- 3 Exemples numériques
- 4 Conclusions**

Conclusions

- La prise en compte de la structure du système dans la maintenance et le regroupement réduit significativement les coûts de maintenance.
- Une stratégies de regroupement dynamique basé sur l'horizon roulant et l'algorithme génétique a été developé pour un système avec structure complexe.
- Cette stratégies est appliquée dans plusieurs cas dynamiques en prenant en compte des différents types des informations à court terme.
- L'utilisation de GA a fourni non seulement la structure groupante optimal avec un temps de calculs raisonnable. De plus, la flexibilité du GA également donne la possibilité la stratégie est encore utilisable dans certains cas (Ex: contrainte de fiabilité,...).

Perspective

- Durée de maintenance corrective;
- Dépendance stochastique;
- Approche multi-échelle du coût de mise en oeuvre;

Références

- Do Van, P. , Bouvard, K., Brissaud, F., Barros, A., and Bérenguer, C. **Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities**. Advance in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.ESREL 2011, 18-22 September 2011, Troyes, France., 2011
- Do Van, P. Hai Canh, V. Barros, A. Berenguer, C. **Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen**. In 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS 2012, Mexico city : Mexico (2012).
- Hai Canh, V. Do Van, P. Barros, A. Berenguer, C. **Maintenance activities planning and grouping for complex structure systems**. In annual Conference of the European Safety and Reliability Association, PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki : Finland (2012).
- Hai Canh, V. Do Van, P. Barros, A. Berenguer, C. **Dynamic grouping maintenance for complex structure systems with non-negligible replacement time**. In 2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology, A-Mest'12, Séville : Espagne (2012).

Merci de votre attention !